

Н. Н. Ермолаева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА

Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Представлены математические модели транспортировки смеси газов по морским газопроводам на шельфе северных морей в различных режимах. Исследованы закономерности поведения давления, скорости и температуры газа вдоль трассы при сверхвысоких давлениях. Сделанные выводы проиллюстрированы графиками распределения этих величин, построенными на основе расчетов по предложенной модели. Охарактеризовано влияние температуры на входе в газопровод на допустимую величину давления. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность работы морского газопровода. Библиогр. 4 назв. Ил. 4.

Ключевые слова: морские газопроводы, сверхвысокие давления, математические модели, особенности поведения скорости, температуры и плотности потока, влияние процессов теплообмена.

N. N. Ermolaeva

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GAS TRANSMISSION PARAMETERS ON FLOW CHARACTERISTICS

St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab.,
St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The mathematical models of a multicomponent gas mixture transmission on the shelf of the Northern Seas in different regimes are presented. Behavior regularities of the pressure, velocity and temperature along the pipeline route in the hyper-pressure range are investigated. The resulting conclusions are illustrated by the diagrams of these value distributions, which were constructed from calculations using presented model. Influence of inlet temperature on the acceptable pressure value is investigated. The factors influencing the efficiency of the sea gas-pipeline are discussed. Refs 4. Figs 4.

Keywords: gas-pipelines, hyper-pressure, mathematical models, the behavioral characteristics of velocity, of temperature and of density of thermodynamic model, the influence of heat exchange processes.

Введение. В ходе предпроектных исследований освоения газоконденсатных месторождений на шельфе северных морей анализируются разные варианты доставки добываемого сырья, одним из них является транспортировка газа по морским газопроводам. Математическая модель различных режимов транспортировки газа позволяет проанализировать возможность реализации того или иного режима эксплуатации морского газопровода. В работах [1, 2] предложены математические модели установившихся и неуставившихся режимов течения газа по морским газопроводам. Установившийся режим является основным режимом эксплуатации. В настоящей статье на примере модельного морского газопровода проведен анализ установившихся режимов течения. Исследовано влияние давления p_{xo} и температуры T_{xo}

Ермолаева Надежда Николаевна — кандидат физико-математических наук, доцент,
n.ermolaeva@spbu.ru

Ermolaeva Nadezda Nikolaevna — PhD of physical and mathematical sciences, associate professor;
n.ermolaeva@spbu.ru

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

на входе в газопровод на величину суммарного падения давления. Найдена зависимость критического давления p_{xo}^* , ниже которого транспортировка газа в выбранных условиях невозможна, от параметров режима. Кроме того, изучено влияние процессов теплообмена потока газа с окружающей средой на плотность и температуру газа и соответственно на величину суммарного падения давления.

Приняты следующие параметры модельного морского газопровода: трасса считается горизонтальной; постоянный массовый расход Q газа равен 400 кг/с; температура T^* окружающей морской воды считается неизменной вдоль трассы и равной 272 К; длина трассы $L = 300$ км; газопровод моделируется цилиндром с внутренним радиусом $R = 0.5$ м, имеющим два слоя обшивки; параметры первого слоя обшивки: толщина $\delta_1 = 0.04$ м, теплопроводность $\lambda_1 = 24$ Вт/(м·К), параметры второго слоя: толщина $\delta_2 = 0.12$ м, теплопроводность $\lambda_2 = 1.7$ Вт/(м·К). В исследуемых режимах для температуры $T(z)$ газовой смеси, как показали расчеты, выполняется такое условие: $T(z) > T_*$ $\forall z \in [0, L]$, где $T_* = 271$ К — температура фазового перехода морская вода–лед. При этом условии оледенение внешней поверхности газопровода невозможно.

Запишем, следуя работе [2], одномерную нестационарную математическую модель течения смеси газов по модельному морскому газопроводу при вышеуказанных условиях:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u^2 + p) = -\frac{\lambda \rho u |u|}{4R}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k}{7.4} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right), \quad (3)$$

$$\text{Re} = \frac{2Q}{\pi R \mu}, \quad k = \frac{k_s}{R},$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho u \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \omega, \quad (4)$$

$$e = \varepsilon + u^2/2,$$

$$p = \frac{h \rho T}{1 - \delta \rho} - \frac{c \rho^2}{(1 + \delta \rho) T^{1/2}}, \quad (5)$$

$$h = R_g/M, \quad M = \sum_{i=1}^f \eta_i m_i, \quad \sum_{i=1}^f \eta_i = 1,$$

$$\delta = b/M, \quad c = a/M^2, \quad b = \Omega_b R_g T_c / p_c, \quad a = \Omega_a (R_g)^2 T_c^{2.5} / p_c,$$

$$\varepsilon = \tilde{c}_v T - \frac{3}{2} \frac{c}{\delta \sqrt{T}} \ln(1 + \delta \rho). \quad (6)$$

Здесь (1) — уравнение неразрывности, (2) — уравнение движения, (3) — уравнение Коулбрука–Уайта, (4) — уравнение полной энергии, (5) — уравнение состояния Редлиха–Квонга, (6) — калорическое уравнение связи внутренней энергии с температурой и плотностью газовой смеси [3].

В системе уравнений (1)–(6) приняты следующие обозначения: u, ρ, p, T — скорость, плотность, давление и температура газовой смеси соответственно, являющиеся функциями времени t и координаты z , направленной вдоль оси газопровода; $\varepsilon = \varepsilon(z, t)$, $e = e(z, t)$ — массовые плотности внутренней и полной энергии газа соответственно; ω — объемная плотность в единицу времени распределенных источников (стоков) внутренней энергии в потоке газа, моделирующих теплообмен с окружающей средой (выражение для $\omega = \omega(z, t)$ приведено далее); $\lambda(\text{Re}, k)$ — коэффициент гидравлического сопротивления; Re — число Рейнольдса; μ — вязкость газовой смеси, k_s — коэффициент эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости внутренней поверхности газопровода; k — относительная шероховатость; h, c, δ — размерные постоянные в уравнении Редлиха–Квонга; R_g — универсальная газовая постоянная; m_i, η_i — молекулярный вес и доля i -й составляющей газовой смеси соответственно; f — количество компонент газовой смеси; Ω_a, Ω_b — числа, определяемые по заданному химическому составу газовой смеси по значениям критических температуры T_c и давления p_c в соответствии с таблицами, приведенными в [4]; коэффициент \tilde{c}_v в уравнении (6) — удельный коэффициент теплоемкости газовой смеси заданного химического состава, но в состоянии идеального газа.

В настоящей работе исследуются установившиеся режимы транспортировки газа. Слагаемое $\omega(z, t)$ в уравнении (4), моделирующее теплообмен потока газа с окружающей средой, для установившихся режимов может быть записано следующим образом [1]:

$$\omega(z, t) = \frac{2\beta(R + \delta_1 + \delta_2)(T^* - T(z))}{R^2 \left(1 + \beta(R + \delta_1 + \delta_2) \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln\left(1 + \frac{\delta_1}{R}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(1 + \frac{\delta_2}{R + \delta_1}\right) \right) \right)}, \quad (7)$$

где β — коэффициент теплопередачи в граничном условии третьего рода на внешней поверхности газопровода. В рамках принятой одномерной модели β является эффективным параметром, учитывающим внешние условия обтекания газопровода. В общем случае β может быть функцией z . Оценки величины β приведены в [1]. Для реальных газопроводов значение β должно находиться из решения обратной задачи.

Запишем вариант модели (1)–(6) для установившегося режима течения в виде

$$\rho u = Q/(\pi R^2), \quad (8)$$

$$\rho u \frac{du}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \frac{\lambda \rho u^2}{4R}, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dz} \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) = \frac{\omega}{\rho u}, \quad (10)$$

$$\text{при } z = 0: \quad \rho = \rho_{xo}, \quad T = T_{xo}. \quad (11)$$

Выражения для давления, внутренней энергии и ω задаются соотношениями (5), (6), (7) соответственно. Запишем модель (8)–(11) в терминах давления, плотности и температуры. Введем характерные значения $\rho_x, T_x, p_x = p(\rho_x, T_x), l_x, u_x = Q/(\pi R^2 \rho_x)$ и опустим штрихи у безразмерных величин ρ, T, p, z, u . В результате модель преобразуется к виду

$$\rho u = 1, \quad (12)$$

$$\frac{d\rho}{dz} = m_1 \rho^2 \frac{dp}{dz} + m_2 \rho, \quad (13)$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{m_4}{\rho^2} + \left(m_5 \frac{p}{\rho^2} + \frac{m_7}{(1+m_3\rho)T^{1/2}} \right) \frac{d\rho}{dz} + m_6(T^* - T), \quad (14)$$

$$p = m_8 \frac{\rho T}{1 - m_3\rho} - m_9 \frac{\rho^2}{(1 + m_3\rho)T^{1/2}}, \quad (15)$$

$$\text{при } z = 0: \quad \rho_0 = \rho_{xo}/\rho_x, \quad T_0 = T_{xo}/T_x. \quad (16)$$

В граничном условии (16) ρ_{xo} , T_{xo} — размерные значения плотности и температуры смеси газов на входе. В математическую модель (12)–(16) входят безразмерные комплексы m_1 – m_9 , которые выражаются через параметры задачи и характерные величины:

$$m_1 = \frac{p_x}{\rho_x u_x^2}, \quad m_2 = \frac{\lambda l_x}{4R}, \quad m_3 = \delta \rho_x, \quad m_4 = \frac{\lambda u_x^2 l_x}{4c_v R T_x}, \quad m_5 = \frac{p_x}{\rho_x c_v T_x},$$

$$m_6 = 2l_x / \left(c_v R^2 \rho_x u_x \left(\frac{1}{\beta(R + \delta_1 + \delta_2)} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(1 + \frac{\delta_1}{R} \right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln \left(1 + \frac{\delta_2}{R + \delta_1} \right) \right) \right),$$

$$m_7 = \frac{3c\rho_x}{2c_v T_x^{3/2}}, \quad m_8 = \frac{h\rho_x T_x}{p_x}, \quad m_9 = \frac{c\rho_x^2}{p_x T_x^{1/2}},$$

здесь c_v — характерный удельный коэффициент теплоемкости при постоянном объеме для транспортируемой газовой смеси, вычисленный при плотности ρ_x и температуре T_x по формуле [3]

$$c_v = \tilde{c}_v T_x + \frac{3}{4} \frac{c}{\delta T_x^{3/2}} \ln(1 + \delta \rho_x).$$

В модели (12)–(16) величины вязкости μ и удельной теплоемкости c_v газовой смеси, а также коэффициент сопротивления λ считаются постоянными. При значительных изменениях плотности и температуры необходим учет изменений μ , c_v , λ по z в зависимости от $\rho(z)$ и $T(z)$.

Система уравнений (12)–(15) может быть разрешена относительно производных $\frac{d\rho}{dz}$ и $\frac{dT}{dz}$. Ее решение сводится к интегрированию следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{f_2 + f_1 f_3 f_T}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T - f_1 f_5 f_T}, \quad (17)$$

$$\frac{dT}{dz} = f_3 + \frac{(f_4 + f_5)(f_2 + f_1 f_3 f_T)}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T - f_1 f_5 f_T}, \quad (18)$$

$$p = f_p, \quad u = 1/\rho \quad (19)$$

с граничным условием (16).

Функции f_ρ , f_T , f_p , f_1 – f_5 выражаются через безразмерные комплексы m_1 – m_9 и безразмерные плотность ρ и температуру T :

$$f_\rho = \frac{\partial p}{\partial \rho} = m_8 \frac{T}{(1 - m_3\rho)^2} - m_9 \frac{\rho(2 + m_3\rho)}{(1 + m_3\rho)^2 T^{1/2}},$$

$$f_T = \frac{\partial p}{\partial T} = m_8 \frac{\rho}{(1 - m_3\rho)} + m_9 \frac{\rho^2}{(1 + m_3\rho)T^{3/2}},$$

$$\begin{aligned}
f_p &= m_8 \frac{\rho T}{1 - m_3 \rho} - m_9 \frac{\rho^2}{(1 + m_3 \rho) T^{1/2}}, \\
f_1 &= m_1 \rho^2, \\
f_2 &= m_2 \rho, \\
f_3 &= m_4 \frac{1}{\rho^2} + m_6 (T^* - T), \\
f_4 &= m_5 \frac{p}{\rho^2} = m_5 \left(m_8 \frac{T}{(1 - m_3 \rho) \rho} - m_9 \frac{1}{(1 + m_3 \rho) T^{1/2}} \right), \\
f_5 &= m_7 \frac{1}{(1 + m_3 \rho) T^{1/2}}.
\end{aligned}$$

Нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений (17), (18) с граничным условием (16) решалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности. Давление p и скорость u определялись по найденным значениям плотности ρ и температуры T из равенств (19).

Для расчетов по модели (12)–(16) были выбраны следующие размерные характерные величины: $\rho_x = 138.02$ кг/м³, $T_x = 283.15$ К, $l_x = 10$ км, им соответствуют характерное давление $p_x = p(\rho_x, T_x) = 150$ атм и характерная скорость $u_x = Q/(\pi R^2 \rho_x) = 3.69$ м/с.

Выбирались параметры $h, c, \delta, \mu, k_s, c_v, \beta$, типичные для задач транспортировки по морским газопроводам в северных морях смеси газов с преобладанием метана. В результате для эталонного варианта были получены такие значения безразмерных комплексов m_1 – m_9 :

$$\begin{aligned}
m_1 &= 8087.419, \quad m_2 = 41.488, \quad m_3 = 0.253, \quad m_4 = 0.0009, \quad m_5 = 0.1945, \\
m_6 &= 0.512, \quad m_7 = 0.267, \quad m_8 = 1.293, \quad m_9 = 0.916.
\end{aligned} \tag{20}$$

На рис. 1, *I–III* представлены рассчитанные для эталонного варианта (20) зависимости размерных характеристик потока $p(z)$, $\rho(z)$, $T(z)$ от температуры T_{xo} на входе в газопровод при давлении $p_{xo} = 140$ атм, на рис. 2 — распределение скорости потока $u(z)$ в зависимости от давления p_{xo} на входе при $T_{xo} = 313.15$ К. Из рис. 2 вытекает, что существует критическое давление p_{xo}^* на входе, при котором транспортировка газа при выбранных параметрах процесса невозможна. Это связано с тем, что с уменьшением давления снижается плотность газа, приводя к увеличению скорости и соответственно к росту гидравлического сопротивления, которое, в свою очередь, вызывает еще большее падение давления и возрастание скорости потока. Как показано на рис. 3, при критическом значении давления на входе скорость потока вдоль трассы, начиная с некоторого сечения, стремительно нарастает и приводит к нереализуемости данного режима. Расчеты по модели (12)–(16) позволяют найти зависимость критического давления p_{xo}^* от температуры T_{xo} на входе в газопровод. В качестве критерия того, что давление p_{xo} является критическим, принималось выполнение условия $\exists z^* \in [0, L)$, при котором $\frac{du}{dz} > A$. Величина A зависит от параметров процесса транспортировки газа и определяется в ходе численного эксперимента. Таким образом, для каждого набора параметров процесса транспортировки существует нижний предел p_{xo}^* допустимого давления на входе в газопровод, он зависит от температуры T_{xo} . Например, для $T_{xo} = 333.15$ К критическое давление на входе равно

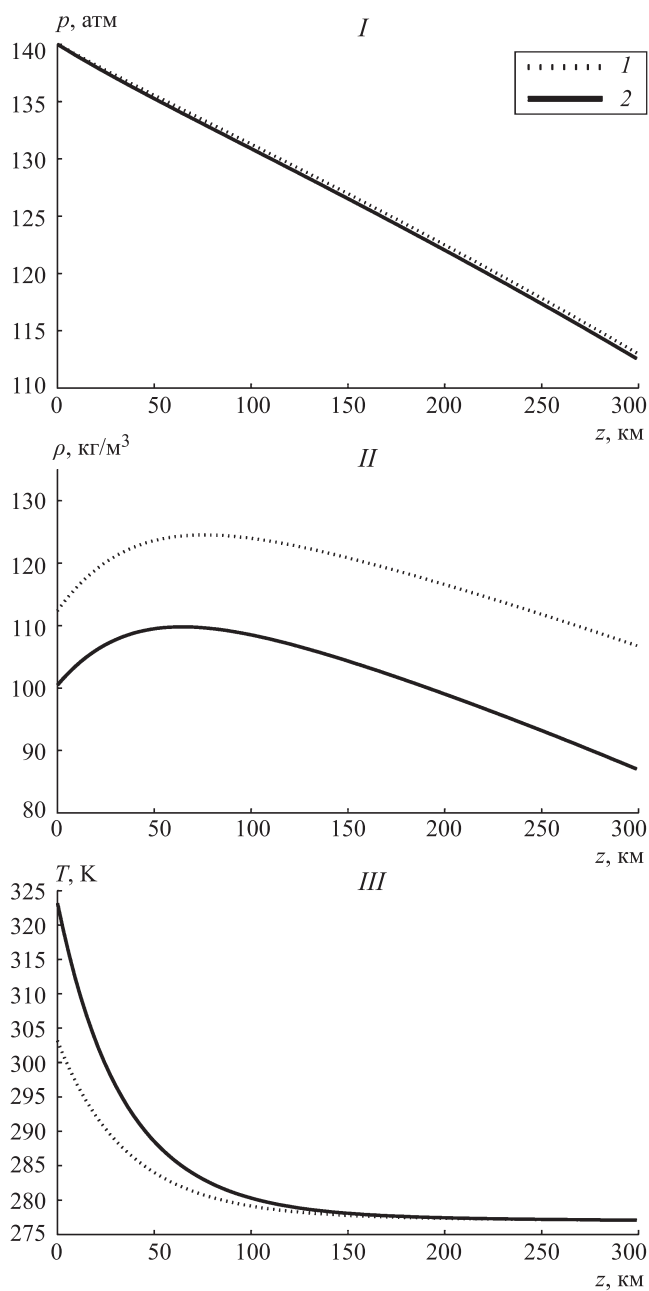


Рис. 1. Зависимость размерных давления смеси газов $p(z)$ (I), плотности $\rho(z)$ (II) и температуры газа $T(z)$ (III) от температуры T_{xo} на входе в газопровод при давлении $p_{xo} = 140$ атм
 1 — $T_{xo} = 303.15$ К; 2 — $T_{xo} = 323.15$ К.

$p_{xo}^* = 113$ атм, а при $T_{xo} = 303.15$ К и неизменных остальных параметрах оно составляет $p_{xo}^* = 105$ атм. На рис. 3, 4 представлены зависимости $u(z)$ при найденных критических значениях p_{xo}^* .

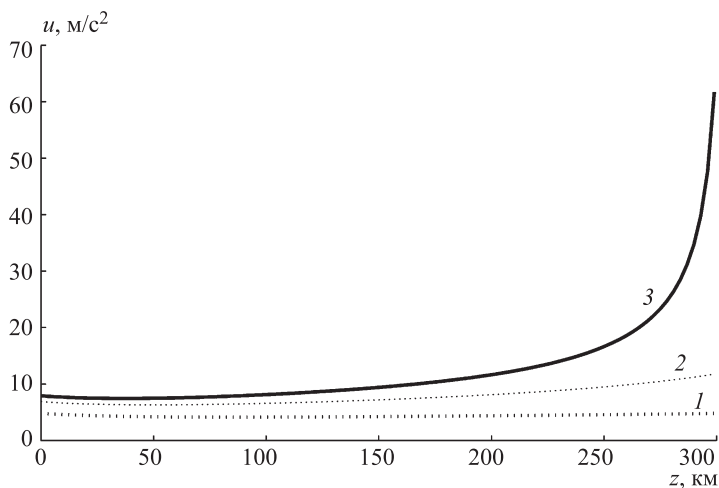


Рис. 2. Зависимость размерной скорости потока $u(z)$ от давления p_{xo} на входе в газопровод при температуре $T_{xo} = 313.15$ K
 1 — $p_{xo} = 140$ атм; 2 — $p_{xo} = 100$ атм; 3 — $p_{xo} = 88$ атм.

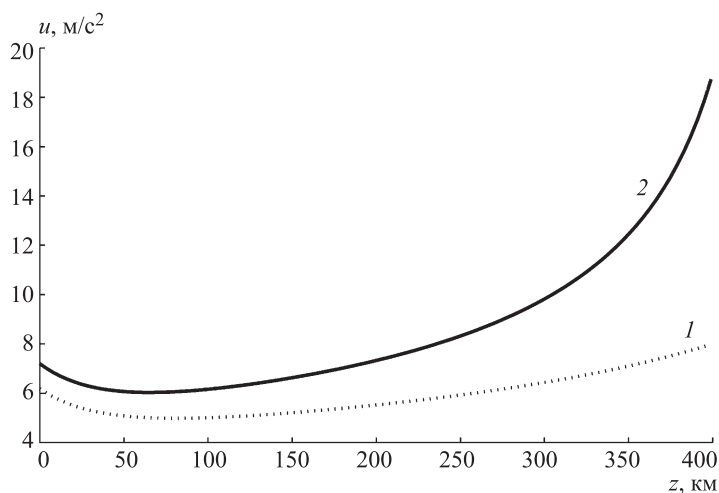


Рис. 3. Зависимость размерной скорости потока $u(z)$ от температуры $T_{xo} = 313.15$ K при давлении $p_{xo}^* = 105$ атм
 1 — $T_{xo} = 303.15$ K; 2 — $T_{xo} = 333.15$ K.

Проведенные расчеты и анализ свидетельствуют (как и следовало ожидать), что рост давления p_{xo} на входе является благоприятным фактором, который вызывает уменьшение как сопротивления, так и суммарного падения давления ($p_{xo} - p_L$). Однако допустимое повышение давления p_{xo} имеет предел, связанный с требованиями прочности газопровода. Следует заметить, что в реальных задачах при переходе к более высоким давлениям на входе увеличивают толщину слоя стали. При этом, если существует ограничение на внешний радиус газопровода, то утолщение слоя стали ведет к соответствующему уменьшению внутреннего радиуса R . Это, в свою очередь, приводит к увеличению скорости потока. В настоящей работе принято $R = \text{const}$.

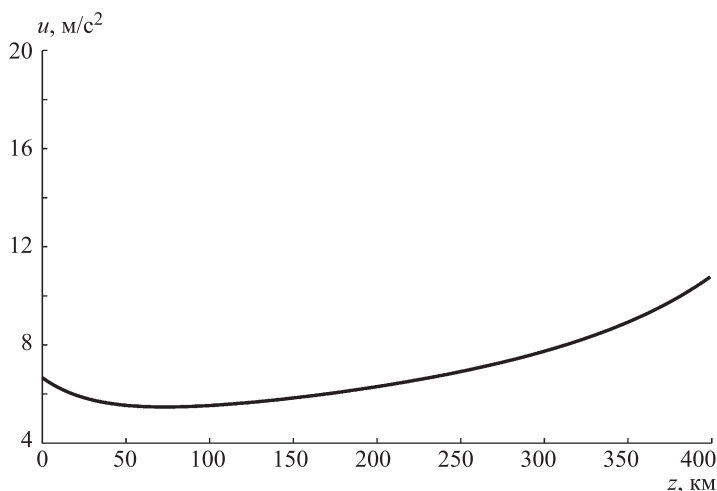


Рис. 4. Распределение размерной скорости потока $u(z)$ при температуре $T_{xo} = 333$ К и давлении $p_{xo} = 113$ атм

В исследуемом диапазоне изменения давления на входе изменение R за счет утолщения слоя стали незначительно. Можно показать, что учет зависимости $R(p_{xo})$ не вносит качественного изменения в сделанные выводы.

Рассмотрим влияние температуры T_{xo} на параметры течения. При неизменном давлении p_{xo} уменьшение температуры T_{xo} вызывает рост плотности газа, что, как показано выше, является благоприятным фактором с гидравлической точки зрения, поскольку влечет за собой снижение скорости потока и соответственно уменьшение падения давления. Однако допустимое понижение температуры газовой смеси на входе в газопровод имеет предел, который связан с тем, что, как известно, с увеличением давления и понижением температуры газовой смеси повышается вероятность образования гидратов, их наличие может привести к аварийной ситуации. Методами борьбы с образованием гидратов в газопроводах являются подогрев газа и его глубокая осушка. Поэтому уменьшение температуры T_{xo} допустимо лишь до определенного предела.

Из расчетов, представленных на рис. 1, II, следует, что плотность газа ведет себя немонотонно на начальном участке трассы. Такой эффект возникает в результате интенсивного теплообмена с окружающей средой при большой разности температур $(T^* - T(z))$ на начальном участке. Эффект тем заметнее, чем больше температура T_{xo} входа. Тем не менее, несмотря на относительно большее уменьшение скорости потока при более высоких температурах T_{xo} , суммарное падение давления меньше при более низких температурах T_{xo} . Например, при $T_{xo} = 323.15$ К $(p_{xo} - p(z = 75 \text{ км})) = 6.94$ атм, тогда как при $T_{xo} = 303.15$ К $(p_{xo} - p(z = 75 \text{ км})) = 6.58$ атм. Представленный анализ показывает, что на начальном участке трассы целесообразно стремиться к максимально возможному увеличению теплообмена между газом и окружающей средой. Этого можно добиться, например, за счет выбора материала обшивок с большими коэффициентами теплопроводности.

Закключение. На основе проведенного исследования закономерностей поведения давления, скорости и температуры смеси газов, транспортируемой по морскому газопроводу при сверхвысоких давлениях, предложена методика расчета величины критического давления на входе в газопровод и рассмотрена зависимость критиче-

ского давления от температуры. Расчеты по предложенной математической модели позволили выявить особенности поведения плотности и скорости газа на начальном участке газопровода и предложить пути повышения эффективности работы морского газопровода в северных морях.

Литература

1. Курбатова Г. И., Попова Е. А., Филиппов Б. В. и др. Модели морских газопроводов. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2005. 156 с.
2. Ермолаева Н. Н., Курбатова Г. И. Квазиодномерная нестационарная модель процессов в морских газопроводах // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. Вып. 3. С. 55–66.
3. Ермолаева Н. Н., Курбатова Г. И. Анализ подходов к моделированию термодинамических процессов в газах при высоких давлениях // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2013. Вып. 1. С. 35–45.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей / пер. с англ.; под ред. Б. И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, Ленингр. отд., 1982. 592 с. (Reid Robert C., Prausnitz John M., Sherwood Thomas K. The properties of gases and liquids.)

Для цитирования: Ермолаева Н. Н. Исследование влияния параметров транспортировки газа на характеристики потока // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2016. Вып. 3. С. 53–61. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2016.305

References

1. Kurbatova G. I., Popova E. A., Filippov B. V. et al. *Modeli morskich gasoprovodov* [Models of sea gas-pipelines]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Publ., 2005, 156 p. (In Russian)
2. Ermolaeva N. N., Kurbatova G. I. Qwasiodnomernaja nestacionarnaja model processov v morskikh gasoprovodah [Quasione-dimensional non-stationary model of processes in a sea gas-pipeline]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2015, issue 3, pp. 55–66. (In Russian)
3. Ermolaeva N. N., Kurbatova G. I. Analiz podhodov k modelirovaniju termodinamicheskikh processov v gasah pri visokih davlenijah [The analysis of the approaches to the modeling of thermodynamic processes in gas flow at hyperpressure]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2013, issue 1, pp. 35–45. (In Russian)
4. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood Th. K. *The properties of gases and liquids*. New York, Saint Louis, San Francisco, McGraw — Hill Book Company Publ., 1977, 592 p. (Russ. ed.: Reid Robert C., Prausnitz John M., Sherwood Thomas K. *Svoistva gazov i zshidkostej*. Leningrad, Chemistry Publ., Leningr. otd., 1982, 592 p.)

For citation: Ermolaeva N. N. Investigation of the influence of gas transmission parameters on flow characteristics. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2016, issue 3, pp. 53–61. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2016.305

Статья рекомендована к печати проф. Н. В. Егоровым.

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2016 г.

Статья принята к печати 26 мая 2016 г.